

KESME AÇIKLIĞI KÜÇÜK OLAN BETONARME KİRİŞLERİN ETRIYE DÜZENİ VE KENETLENME YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Fatih Mehmet Özkal¹

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzincan Üniversitesi, Erzincan

ABSTRACT

Throughout the design of reinforced concrete (RC) members, generally, biaxial state of stress, which consists of flexural and shear effects, is investigated. Although shear effects are examined in the subsequent calculation stage owing to the dimensional properties of bearing members, it is expected that a structure exhibits a ductile fracture by resisting those shear effects based on the general acceptance of reinforced concrete. Stirrups, which are also entitled as shear reinforcements, are used for providing the shear capacity of structural members. In this study, an experimental investigation on the RC beams with small shear span was carried out in order to observe the shear effect as well as the virtual braced-arch behavior in the beam and the restriction capacity of various stirrup designs on that behavior. Besides using various type stirrups in the 9 RC beams, also various type and position of the stirrup hooks were formed in order to investigate their anchorage properties.

ÖZET

Betonarme yapı elemanlarının tasarımında, genel olarak eğilme ve kesme etkilerinin dikkate alındığı iki eksenli bir gerilme durumu incelenmektedir. Taşıyıcı elemanların boyut özelliklerinden dolayı hesaplamalarda kesme etkisi sonraki aşamada ele alınsa da, betonarmenin genel kabulünden hareketle yapıdan beklenen, kesme etkilerine karşı mukavim bir davranış ve sünek bir kırılma şekli sergilemesidir. Yapı elemanlarının kesme kapasitelerinin sağlanmasında ise kesme donatısı olarak da tanımlanan etriyeler kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, kesme açıklığı küçük olan betonarme kirişler ele alınarak kesme etkisinin yanı sıra kiriş içerisinde oluşan gergili bir kemer davranışının da etkileri ve bu etkileri sınırlama adına farklı etriye tasarımlarının ne seviyede katkı sağlayacağı deneysel olarak incelenmiştir. Hazırlanan 9 adet kirişte farklı türlerde etriyeler kullanılırken, bu etriyelerin kancalarının göstereceği kenetlenme özelliklerini de inceleyebilmek için farklı tür ve konumda kancalar teşkil edilmiştir.

GİRİŞ

Betonarme yapı elemanlarının yüksek başarıma sahip bir davranış sergileyebilmesi, beton ve donatı arasındaki etkili bir uyumu gerektirmektedir. Sadece hesaplama sonucunda belirlenen yeteri miktardaki donatı yerleştirilmesine ilaveten, bütün yükleme durumları altında tatmin edici bir davranış için donatının uygun bir şekilde detaylandırılması da büyük önem taşımaktadır. Betonarmede bileşik eğilme etkisindeki elemanlar için önce eğilme etkilerini karşılamak üzere boyuna donatı hesabı, ardından ise kesme etkilerini karşılamak üzere enine donatı hesabı gerçekleştirilmektedir. Bu hesaplar Türk ve yabancı ülkelerin standartlarında, esasen elemanların maruz kaldığı etkilerin değerleri üzerinden yapılırken bazı boyut etkileri göz ardı edilmektedir. Zira betonarme kirişlerde a/d oranı olarak tanımlanan kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı yapısal davranışta önemli farklar doğurmaktadır. Bu oran doğrultusunda kiriş davranışı ile kemer davranışı arasında bir geçiş ortaya çıkmaktadır. Betonarme bir kirişte enine donatı yani etriye bulunmaması halinde bile, kemerlenme etkisi şeklinde tanımlanan durum sebebiyle kiriş kırılma yükü, hesaplanan kesme dayanımını aşabilmektedir. Kirişte etriye yerleştirilmesi durumunda ise bu donatılar, kesme etkisinin yaratacağı asal çekme gerilmelerini karşılamamanın yanı sıra kiriş içerisinde olduğu varsayılan

gergili kemerin genel davranışa katkısını da değiştirmekte ve yine standartlardaki yaygın yaklaşımın dışında sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranının düşük olması halinde, kiriş davranışı önemini yitirmesine rağmen yine de etriye düzeninin yapısal davranışa etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Kiriş davranışından mümkün olduğunca uzaklaşmak ve hayali kemerin basınç çubuklarının 45° açıda oluşmasıyla kesme etkisinden kaynaklanan asal çekme gerilmelerinin de bu basınç çubuklarına dik şekilde oluşmasını sağlamak adına a/d oranı yaklaşık 1,0 olacak şekilde bir kiriş boyutlandırması tercih edilmiştir. Etriyeler ise farklı türlerde tasarlanırken ayrıca kanca konum ve şekilleri de dikkate alınarak kenetlenme yönünden değerlendirilmek üzere deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

BETONARMENİN KESME ETKİSİ ALTINDA DAVRANIŞI

Eğilme durumunun betonarme elemanlarda yaratacağı çekme ve basınç etkilerinin yanı sıra kesme durumunun yapısal davranış üzerinde yaratacağı etkiler de önemli bir yer tutmakta olup tasarım aşamasında göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Betonun kesme dayanımının çekme dayanımına nazaran yüksek olması sebebiyle betonarmede doğrudan bir kesme kırılmasına genel olarak rastlanmazken, kesme etkilerinin yarattığı kayma gerilmelerine ilaveten eğilme etkilerinin yarattığı normal gerilmelerin de katkısıyla gelişen asal çekme gerilmelerinin oluşturacağı hasarları ve özellikle gevrek kırılmayı önleme adına enine donatılar büyük rol oynamaktadır. Basit kesme durumunda bile bu sebepten dolayı yapısal davranışı belirleyen etken, yine eğik çekme gerilmeleri olarak da isimlendirilen asal çekme gerilmeleridir. Bu kabul ilk olarak Mörsch [1] tarafından 1902 yılında “klasik kafes kiriş benzeşimi” kuramı dâhilinde gündeme getirilmiş ve sonrasında bu iç kafes yaklaşımı temelinde birçok farklı çalışma daha gerçekleştirilmiştir.

Betonarme kirişlerin davranışı için genel kabul, kiriş üzerine yük uygulanmaya başlandığında taşıma gücüne erişmeden çok önce çekme kuşağında çatlakların ortaya çıkacağıdır. Ancak birim şekil değiştirmelerin $\%0,1$ 'den az olması kaydıyla beton ve çelik donatı arasında uyumlu bir davranış görülmekte, dolayısıyla bu çatlaklar kılcal ve önemsiz nitelikte olmaktadır. Ancak yük değerinin artırılması, çatlak sayısı ile birlikte çatlak boylarını da artırırken basınç kuşağı alanının küçülmesine sebep olmaktadır. Boyuna donatının akma seviyesine ulaşmasıyla ise eğilme etkisi altında göçme gerçekleşmektedir. Kani [2], betonarme kirişlerin artan yükler altındaki bu davranışını tarak görüntüsüyle benzeştirmektedir. Çekme kuşağındaki eğilme çatlakları sebebiyle beton dişlerin ortaya çıktığını, böylece basınç kuşağının ise beton tarağın omurgası gibi görüldüğünü ifade etmiştir. Yükün daha da artırılması halinde ise, tasarım özelliklerine bağlı olarak, beton basınç kuşağı alanının iyice küçülmesi ardından bu kuşaktaki gerilmeler ani olarak yükselerek beton basınç dayanımına ulaştığında betonda ezilmeye yol açabilmektedir.

Eğilme etkilerine karşı yeterli şekilde donatılmasına karşın kesme etkilerine karşı zayıf kalacak şekilde tasarlanan betonarme kirişlerin davranışı ve göçme mekanizması ise daha farklı olmaktadır. Kesme kuvveti etkisiyle yükleme ve mesnet noktaları arasında kalan ve kesme açıklığı olarak tanımlanan bölgede, asal gerilmelerin sebep olduğu yaklaşık 45° eğimli çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakların ilerlemesini ve açılmasını takiben yine bu çatlaklar hizasında betonun ayrılması ile ani ve gevrek nitelikte göçme gerçekleşmektedir. Göçmeye kesme kuvveti veya daha açık bir ifadeyle kesmeye bağlı kayma gerilmeleri sebep olduğundan kesme kırılması olarak isimlendirilmektedir. Dolayısıyla betonarme elemanlar tasarlanırken, eğilme etkisine bağlı olarak moment taşıma kapasitesi belirlendikten sonra tasarım kesme kuvvetinden daha büyük olacak seviyede bir kesme dayanımı hedeflenmelidir. Eğik çatlaklar oluşmadan önce kirişin kesme kapasitesi, enine donatı mevcut değilse sadece betona bağlı olarak

hesaplanmaktadır. Enine donatıların bulunması halinde ise, kesme donatısı katkısı (V_w) ile emniyetli tarafta kalma adına beton kesitin çatlama dayanımı küçültülerek bulunan beton katkısı (V_c) toplanarak kesme dayanımı hesaplanmaktadır (Denk. 1).

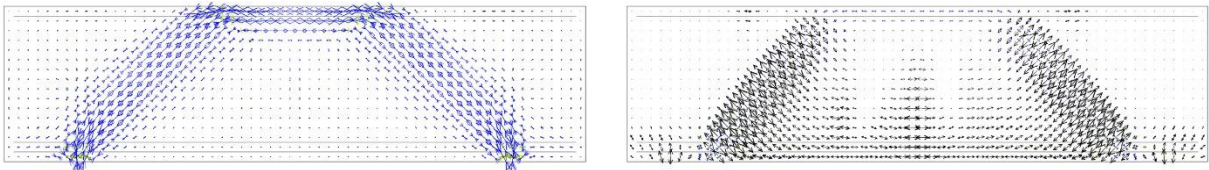
$$V_d = V_w + V_c \quad (1)$$

Eğik çatlak oluşuktan sonra ise çatlak kesitinde daha farklı bir durum söz konusudur. Kirişin taşıdığı kesme kapasitesi, enine donatının yanı sıra üç ayrı iç kuvvetle dengelenmektedir. Bu durumda henüz eğik çatlağın ulaşmadığı basınç kuşağında beton tarafından taşınan kesme kuvveti (V_{cc}), çekme kuşağındaki boyuna donatının kaldıraç etkisiyle taşıdığı kesme kuvveti (V_{cd}) ve çatlak yüzeyindeki agregalar arasındaki sürtünmeye bağlı olarak ortaya çıkan çatlak içi kayma gerilmelerinin düşey bileşeni (V_{ci}) hesaba katılmaktadır. Ayrıca çatlak düzlemini kesen enine donatıların katkısı da ($\sum F_{sw}$) bu donatıların sayısı dikkate alınarak hesaba dâhil edilmektedir (Denk. 2).

$$V = V_{cc} + V_{cd} + V_{ci} + \sum F_{sw} \quad (2)$$

Oluşan eğik çatlak genişledikçe çatlak yüzeyindeki agrega kenetlenmesi zayıflayacağından çatlak içi kayma gerilmelerinin katkısı da düşecektir. Kesme donatısının da akma seviyesine ulaşmasıyla ya boyuna donatının kaldıraç etkisinin azami kapasiteye ulaşmasıyla donatı boyunca yarılması ya da basınç kuşağındaki betonun basınç dayanımı değerinin aşılması ve ezilmesiyle kırılma durumu görülmektedir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların işaret ettiği üzere eğik çatlak oluşuktan sonra betonarme elemanın maruz kaldığı toplam kesme kuvvetinin yaklaşık olarak %20'si kaldıraç, %50~70'i ise çatlak içindeki sürtünme etkisiyle kayma gerilmeleri tarafından karşılanmaktadır [3].

Betonarme kirişlerin kesme davranışında asal şekil değiştirmelerin doğrultusu da en önemli etkenlerden birisi olup tasarım ve hesap süreçlerinde göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle etriyelerin kesme dayanımına katkısı asal şekil değiştirmelerin doğrultusuna bağlı olup Mohr çemberi kullanılarak veya deneylerde ölçülen birim şekil değiştirmelerden hesaplanabilir [4]. Bu çalışmada enine donatısız olarak tasarlanan deney numunesi üzerinde doğrusal olmayan sonlu elemanlar çözümlemesi gerçekleştirilmiş ve göçme durumundan hemen önce kirişteki asal gerilme ve asal şekil değiştirme doğrultuları Şekil 1'de sunulmuştur (siyah vektörler artı değerleri, mavi vektörler ise eksi değerleri ifade etmektedir). Asal gerilme doğrultularına bakıldığında sözü edilen gergili kemer davranışı açık bir şekilde görülürken asal şekil değiştirme doğrultuları da çekme gerilmelerinin özellikle beton basınç çubuğu eksenine dik bir şekilde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır.

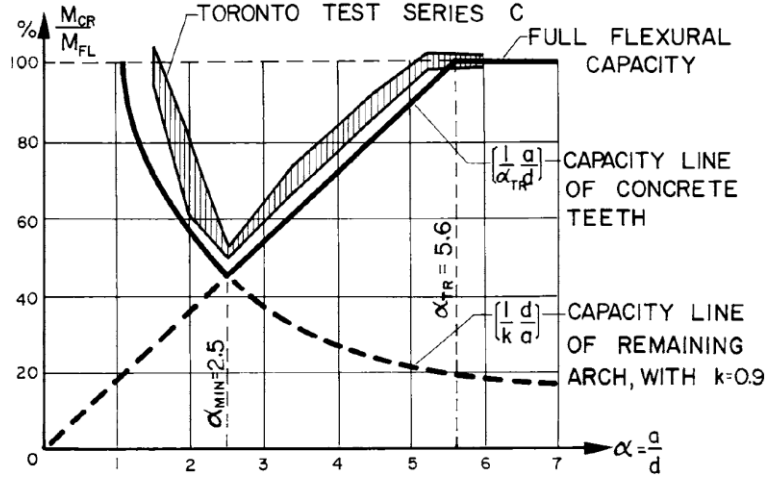


Şekil 1. Sonlu elemanlar çözümlemesinden alınan asal gerilme ve asal şekil değiştirme doğrultuları

KESME AÇIKLIĞI-FAYDALI YÜKSEKLİK ORANININ DAVRANIŞA ETKİLERİ

Betonarme kirişlerde kesme açıklığı-faydalı yükseklik oranının (a/d) yapısal davranışa etkisinin önemli seviyede olduğunu ortaya koyan öncü çalışmalar ardından konu üzerine daha detaylı inceleme ve araştırmalar da bugüne dek süregelmiştir. Mörsch'ün [1] kafes kiriş kuramı temelinde betonarme kirişlerin genel olarak hayali bir iç kafes temelinde çalıştığı kabul edilmektedir. Ancak a/d oranının değerine göre yapısal davranışta büyük farklılıklar söz konusudur. $a/d > 7,0$ olduğu durumlarda eğilme momenti çok yüksek değerlere erişeceğinden kesme etkisinden bağımsız olarak göçme gerçekleşmekte ve kiriş eğilme kapasitesine

ulaşmaktadır. $a/d < 7,0$ olması halinde ise Şekil 2'deki grafiğe benzer nitelikte sonuçlara ulaşılmakta ve kirişin davranışında kesme kuvvetinin etkileri görülmektedir. Kani [2] tarafından kesme vadisinin gösterildiği bu grafikte, a/d oranına göre, yükleme sonunda ulaşılan moment taşıma gücünün hesaplanan moment taşıma kapasitesine oranının değişimi görülmektedir. $2,5 < a/d < 7,0$ olduğunda elemanda kiriş davranışı daha hâkim iken, $1,0 < a/d < 2,5$ aralığında gergili kemer davranışı ortaya çıkmaktadır. $a/d \approx 2,5$ ise kemer ve kiriş davranışını ayıran sınır olarak tanımlanabilirken muhtelif yapısal özelliklere göre bu sınır değer 2,0 ile 3,0 arasında bulunabilmektedir. $a/d < 1,0$ olduğunda ise kiriş davranışı tamamen etkisini yitirmekte ve sadece gergili kemer etkisinde bir davranış görülmektedir.



Şekil 2. Kani'nin [2] kuramsal ve deneysel sonuçları karşılaştırdığı kesme vadisi grafiği

Kesme açıklığı-faydalı yükseklik oranının yüksek olduğu betonarme kirişlerde gergili kemer etkisi daha da azaldığından beklenen kesme kırılması çok daha ani ve gevrek olarak ortaya çıkmaktadır. Kesme açıklığı küçüldükçe etkisi artan gergili kemer davranışı daha önce bahsedilen dişli tarak yapısını zayıflatmaktadır. Ancak bu ifadeyle beton dişlerin taşıma kapasitesine ulaşıldığında yani çekme kuşağındaki donatı ile beton arasındaki aderans kaybolmaya başladığında hemen göçme gerçekleşeceği anlaşılmamalıdır. Muhtelif yapısal ve tasarım özelliklerine bağlı olarak gergili kemerin taşıma kapasitesi daha üst seviyelere ulaşabilmektedir [2].

Kesme açıklığı-faydalı yükseklik oranının düşük olduğu (özellikle 1,0 ile 2,5 arasındaki) kirişlerde, sıra dışı olarak nitelendirilebilecek şekilde, kesme açıklığı yerine orta bölgeye enine donatı yerleştirildiğinde daha yüksek kesme kapasitesi ve sünekliğe ulaşıldığını gösteren [5] çalışmalar da literatürde mevcuttur. Zira orta açıklıkta enine donatı bulunmaması halinde yükleme bölgesindeki beton ezilmesi yerine orta açıklıktaki basınç kuşağının ayrılması şeklinde de göçmeye ulaşılabilirdiği görülmüştür. Ayrılmayı ise çok eksenli gerilme durumları sebebiyle basınç kuşağında ortaya çıkan çekme gerilmeleri sağlamakta; kesme açıklığında oluşan eğik çatlağın uzayarak yük noktası civarında basınç kuşağına ulaşmasıyla göçme gerçekleşmektedir. İlgili çalışmalarda görülmüştür ki, kesme açıklığına yerleştirilen enine donatılar, eğik çatlakların oluşmasını geciktirerek yapısal davranışı iyileştirme yönünde katkı sağlasa da elemanın kesme kapasitesini ve sünekliğini artırma yönünde çok büyük değişimler getirmemektedir. Enine donatıların orta açıklıkta bulunması halinde ise eğik çatlağın basınç kuşağına doğru yayılımını geciktirme veya hatta önleme biçiminde daha etkili olmaktadır.

ENİNE DONATI DÜZENİNİN DAVRANIŞA ETKİLERİ

Betonarme yapı elemanlarının kesme etkilerine karşı dayanımını sağlamak için enine donatı olarak genellikle etriyeler kullanılmaktadır. Kesme etkilerinden kaynaklanan asal çekme gerilmelerini karşılamak için etriyelerin bu gerilmelere dik bir biçimde konumlandırılması en yüksek tesiri gösterecektir ancak özellikle depreme bağlı olarak gelişen tersinir yükleme durumlarında betonarme eleman içerisindeki asal gerilmelerin yönü de değişeceğinden, etriyeler genel olarak eleman eksenine dik bir biçimde yerleştirilirler.

Betonarme kolonlarda eksenel yük durumunun yapısal davranış üzerinde büyük etkisinin olması sebebiyle eksenel yüke karşı betonun basınç dayanımı ön plâna çıkmakta, enine donatıların sargı etkisiyle eğilme sünekliğini de artırması beklenmektedir. Betonarme kirişlerde ise kesme etkilerinin yarattığı asal çekme gerilmelerini karşılayabilmek için kesme donatısı olarak da tanımlanan enine donatılar yerleştirilmektedir. Kiriş eleman içerisinde yeterli kesme donatısı bulunmaması halinde, artan yük etkisi altında, henüz eğilmenin yaratacağı basınç ve çekme etkilerine karşı sınır gerilme değerlerine ulaşılmadan, özellikle mesnetlere yakın bölgelerde yaklaşık 45° eğimli çatlakların gelişmesiyle kırılma durumu görülebilmektedir.

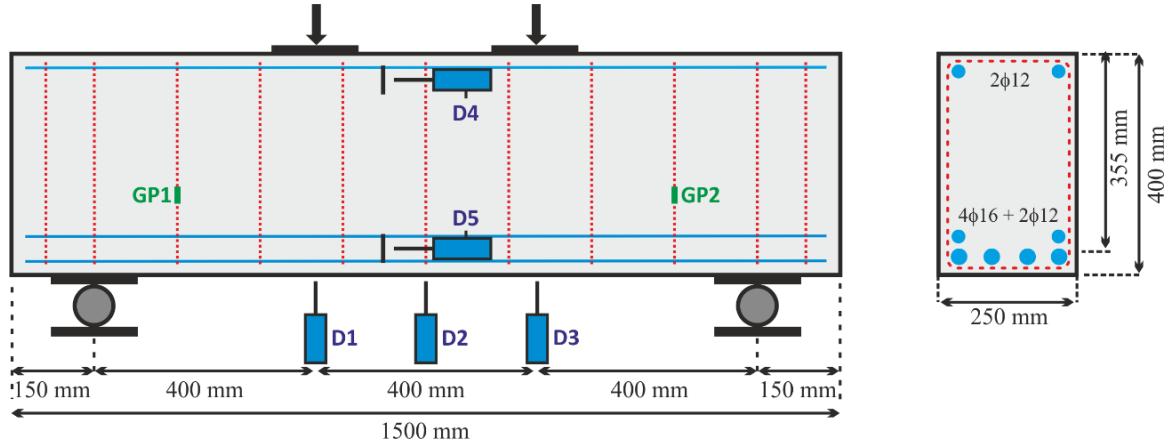
Betonarmenin bir bütün halinde davranış sergileyebilmesi için ise aderans ve kenetlenme hususu büyük önem taşımaktadır. Aderans kavramıyla beton ve çelik arasındaki bağ kuvvetleri şeklinde daha kapsamlı bir tanımlama amacı güdüldürken kenetlenme kavramıyla ise daha çok, çelik bir donatının hesaplanan çalışma bölgesinde kesilmeyip muhtelif kurallar dâhilinde uzatılarak aderansın artırılması kastedilmektedir. Etriyelerin yerleşiminde de düz bir kenetlenme boyu veya bununla birlikte kancalar kullanılarak ihtiyaç duyulan kenetlenmenin sağlanması hedeflenmektedir.

Betonarme kirişlerdeki kafes benzeşimi kuramlarında da vurgulandığı üzere, iç kuvvetler düğüm noktalarında dengelenmekte ve etriyelere yeterli seviyede kuvveti aktarabilmek için kenetlenme durumuna dikkat edilmelidir. Bunun için öncelikli olarak tercih edilen kancaların ise basınç kuşağında teşkil edilmesi önemlidir. Kancaların çekme kuşağında bulunması halinde çatlak oluşumu sonrasında kabuk betonu zayıflayacağından kenetlenme de zayıflayacaktır [6].

Bu çalışmada dikkate alınan tasarım değişkenleri arasında bulunmamasına karşın genişliği fazla olan kirişler için etriye tasarımında farklı bir hususa daha dikkat edilmelidir. Eleman içerisinde olduğu varsayılan hayali kafesin düğüm noktaları, boyuna ve enine donatıların kesiştiği bölgelerde oluşacağından, etriye kollarının sadece elemanın yan yüzlerinde teşkil edilmesi halinde bu bölgelerde gerilmeler yoğunlaşacak ve iç kısımdaki boyuna donatıların yapısal davranışa katkısını etkisizleştirecektir [6]. Etriye kolu sayısı, bu durumun önüne geçmek için kiriş genişliğine bağlı olarak belirlenmelidir.

DENEY NUMUNELERİNİN TASARIMI

Çalışma kapsamında 1500 mm uzunlukta ve 250 mm x 400 mm kesite sahip 9 adet betonarme kiriş, muhtelif yerleşim ve kenetlenme özelliklerine sahip etriyelerle donatılarak dört noktalı yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Mesnetlerden 400 mm içeride belirlenen simetrik noktalara tek yönlü ve artırımlı olarak tekil yükler uygulanmıştır. Şekil 3'te deney numunelerinin detayları ile yükleme ve ölçüm düzeni görülmektedir. Deney numunelerinin sehim değerleri D2 yer değiştirme ölçerinden alınırken, D4 ve D5'ten ise eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan eğriligi teyit etme amacıyla D1-D2-D3'ten de ayrıca eğrilik hesabı yapılmıştır. Etriyelerin birim şekil değiştirme değerlerini almak için ise GP1 ve GP2 gerinim pulları kullanılmış olup bu pullar eğik çatlağın geçeceği tahmin edilen hat üzerine denk gelecek şekilde yapılandırılmıştır. Etriye bulunmayan deney numunesinde ise kiriş davranışı üzerine daha net yorum yapabilmek amacıyla sadece en alttaki boyuna donatılardan ölçüm yapılmıştır. Deney numunelerinde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 1'de sunulmuş olup TS 500 [7] standardında bulunan yönergeler dâhilinde ancak malzeme emniyet katsayısı 1,0 alınarak hesaplamalar ve üretim yapılmıştır.



Şekil 3. Kiriş detayları ve deney düzeni

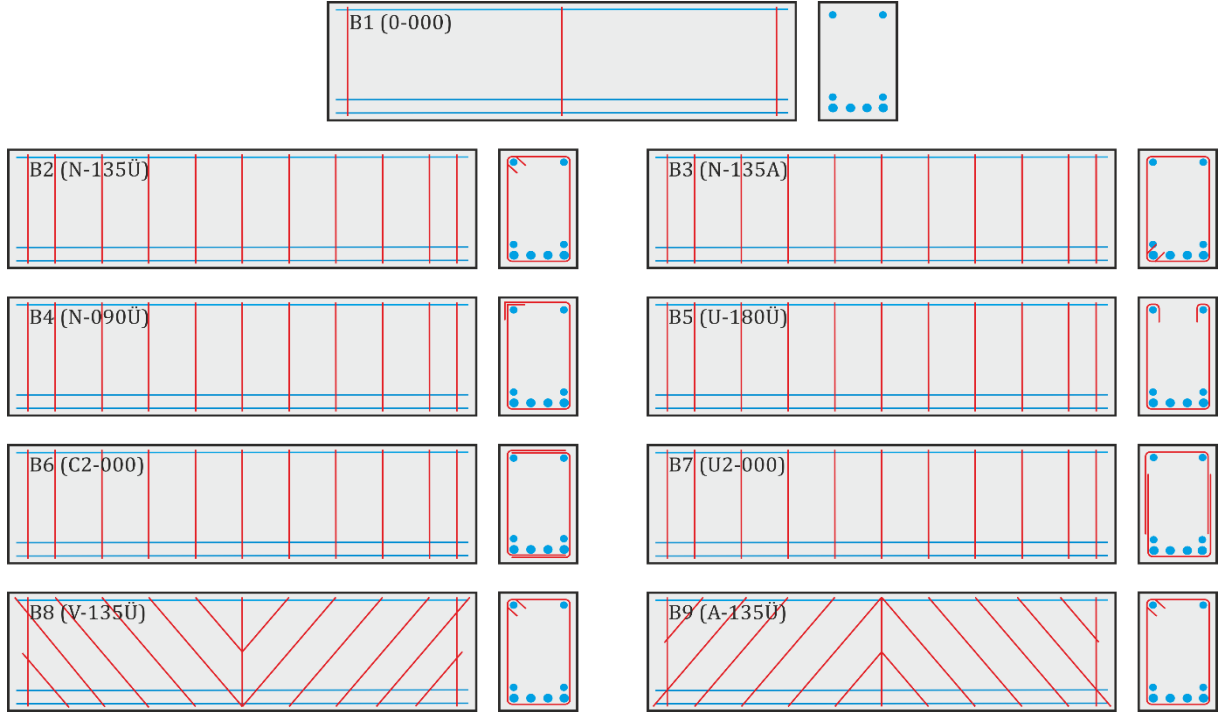
Çizelge 1. Kullanılan malzeme özellikleri

Beton				Çelik			
f_{ck} (MPa)	f_{ctk} (MPa)	E_c (MPa)	ε_{cu}	f_{yk} (MPa)	f_{su} (MPa)	E_s (MPa)	ε_{su}
25	1,8	$30 \cdot 10^3$	0,003	500	620	$210 \cdot 10^3$	0,0024

Gerçekleştirilen çalışmada etriyelerin yerleşimi ve kenetlenme özellikleri üzerinden yapısal başarıma dönük incelemeler yapılmıştır. Kirişlerin eğilme kırılması göstermemesi için kesme kapasitesine kıyasla eğilme kapasitesi yaklaşık iki kata çıkarılmış ve buna göre belirlenen oranda çekme donatısı yerleştirilmiştir. Deney numunelerinde dörtgen kapalı etriyeler, U biçimli, çift U biçimli ve çift C biçimli etriyeler; kiriş eksenine 45° ve 90° açıyla yerleştirilmiş, kancaları ise 90°, 135°, 180° veya düz bindirme şeklinde oluşturulmuştur. Kiriş isimlendirmelerinde “X-iiiY” biçiminde bir şablon kullanılmıştır. Bu şablonun “X” kısmında; normal kapalı etriye için “N”, U tipi etriye için “U”, düz bindirmeli çift U tipi etriye için “U2”, düz bindirmeli çift C tipi etriye için “C2”, kiriş eksenine 45° açıyla ve beklenen eğik çatlaklara dik olarak konumlandırılan etriyeler için “V”, paralel konumlandırılanlar için ise “A” harfi kullanılmıştır. İsimlendirme şablonundaki “iii” kısmı etriye kancalarının açısını temsil ederken, en sondaki “Y” harfi ise kancanın üst bölgede (Ü) veya alt bölgede (A) bulunduğunu göstermektedir. Şekil 4’te deney numunelerinin boyuna ve enine kesitleri detaylı biçimde gösterilmiştir.

DENEYSEL BULGULAR

Daha önce belirtildiği üzere kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) yapısal davranış açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bilgi ışığında, bu çalışmada da a/d oranının yaklaşık 1,0 olması sebebiyle kirişlerin davranışında kesme etkisinin yanı sıra gergili kemer etkisi de önemli seviyede varlığını göstermektedir. Bu etkiye bağlı olarak kiriş içerisinde oluşan hayali bir kemerin varlığından söz edilebilmektedir. Kemerin mesnetler ve yükleme noktaları arasındaki kısmı bir basınç çubuğu şeklinde çalışacak; basınç çubuklarında eksenlerine dik biçimde ortaya çıkacak asal çekme gerilmelerinin seviyesi ile betonun basınç dayanımına bağlı olarak bu basınç çubuklarının ezilip ezilmeyeceği de göçme durumunu etkileyecektir. Bu davranış Şekil 1’den de görülmektedir. Bugüne dek literatürde konu üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, kesme açıklığı uzunluğuna bağlı olarak betonarme kirişlerde kiriş ve kemer davranışının birlikte görülebileceğini, a/d oranının genel olarak 3’ten daha yüksek olması halinde kiriş davranışının hâkim olacağını ortaya koymuştur ki, sonlu elemanlar çözümlemesinden alınan sonuçlar da bu tezi doğrulamaktadır.



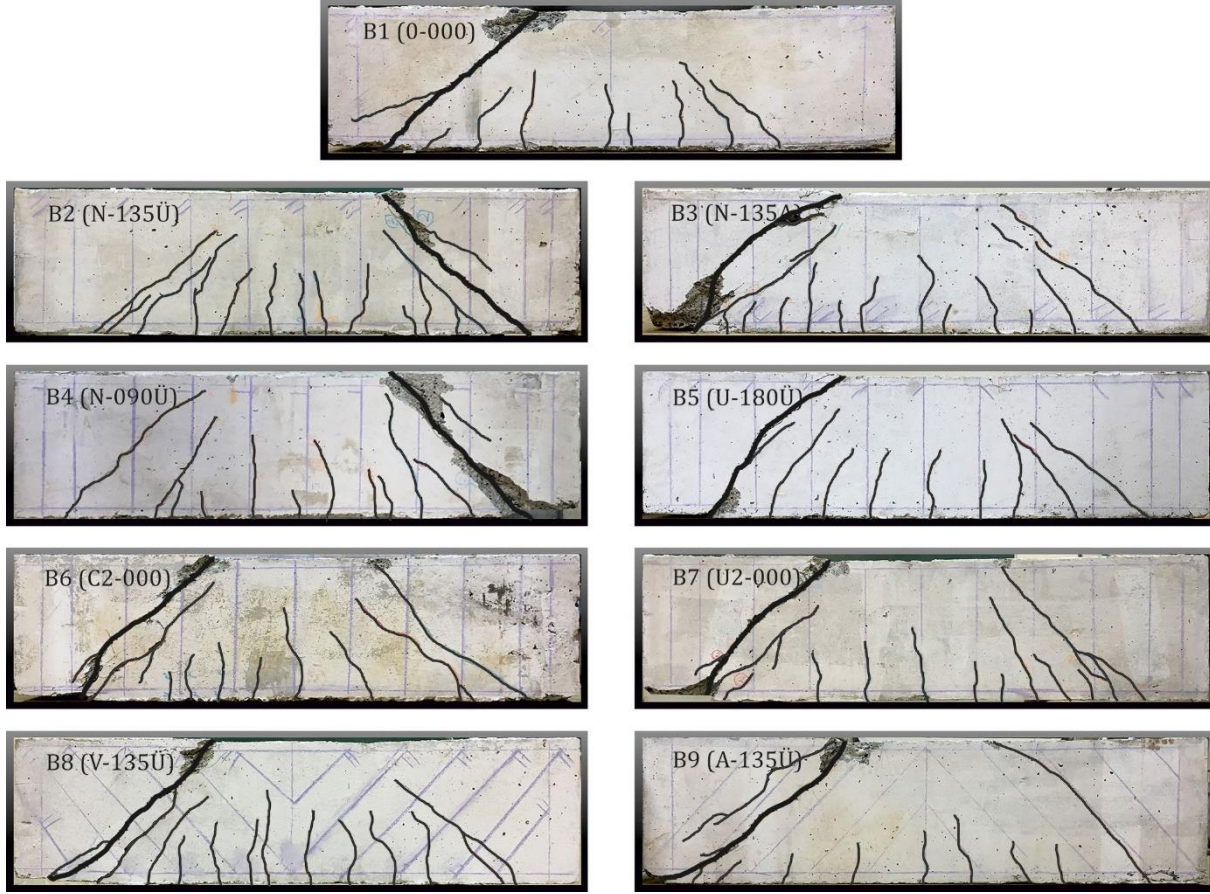
Şekil 4. Deney numunelerinin boykesit ve enkesit detayları

Deney kirişlerinin yükleme programı tamamlandıktan sonraki çatlak dağılımları Şekil 5’te sunulmuştur. Beklendiği üzere bütün kirişler kesme açıklığındaki eğik çatlakların uzaması ve açılmasıyla göçme durumuna ulaşsa da tasarım özelliklerine bağlı olarak farklı yapısal sonuçlar elde edilmiştir. Kesme açıklığı kavramının yapısal davranış üzerindeki etkilerini daha net görebilmek adına Çizelge 2’de etriye bulunmayan B1 kirişi ve 135° kancalı dörtgen kapalı etriye bulunan B2 kirişi için, hem klasik kiriş davranışı temelinde hesaplanan hem de deneyler sonucunda elde edilen kesme ve eğilme kapasitesi değerleri sunulurken; etriye düzeninin etkilerini karşılaştırmak adına bütün kirişlere ait deneysel sonuçlar Çizelge 3’te verilmiştir.

Çizelge 2. Hesaplanan ve deneylerde ulaşılan kiriş kapasiteleri

	Tasarım				Deney		
	V_d (kN)	F_d^V (kN)	M_d (kN·m)	F_d^M (kN)	V_u (kN)	M_u (kN·m)	F_u (kN)
B1 (0-000)	103,8	207,6	157,9	789,6	272,3	108,9	544,5
B2 (N-135Ü)	222,8	445,6	157,9	789,6	381,2	152,5	762,5

Çizelge 2’den görüleceği üzere etriye bulunmayan B1 kirişi, tasarım kesme kapasitesinden hesaplanan taşıma gücünün 336,9 kN üzerinde bir yük değerine erişirken, bu fark dörtgen kapalı etriye bulunan B2 kirişinde de yaklaşık olarak aynı seviyededir (316,9 kN). Bu bulgudan hareketle gergili kemer davranışının kesme kapasitesine katkısını görmek mümkündür. Ancak Kani [2] deneylerinin aksine tasarım eğilme momentine ulaşamamıştır. Kesme vadisi için literatürde sıkça atıfta bulunulan Kani deneylerinde b_w/d oranı 0,56 ve çekme donatısı oranı %1,9 iken bu çalışmada aynı değerler sırasıyla 0,69 ve %1,1 olarak bulunmaktadır. Gerek kesit boyutları ve gerekse donatı oranının kesme kapasitesi üzerindeki etkisi sebebiyle ulaşılan kırılma yükünün daha düşük olduğu düşünülmektedir. Zira yine Kani’nin çalışmasında atıfta bulunduğu benzer çalışmalardaki farklı boyut ve donatı oranlarına sahip kiriş deneylerinde, bu ifadeyi destekler nitelikte bulgular mevcuttur.



Şekil 5. Deney numunelerinin çatlak dağılımları

Gerçekleştirilen deneylerde, asal çekme gerilmeleri sebebiyle kesme açıklığında ortaya çıkan ve mesnetten başlayıp yük noktasına doğru uzanan eğik çatlakların kirişlerin üst kısmındaki basınç kuşağına ulaşması ile beton basınç çubuğu ayrılmış ve göçme gerçekleşmiştir. Deney numunelerinde yük seviyesi yükseldikçe etriyelerin davranışa katkısı daha da belirginleşmiş, bazı numunelerde etriye kenetlenmesi yetersiz kalırken bazılarında ise etriyelerin akma sınırına ulaşmasıyla betondaki eğik çatlaklar açılmış ve göçme gerçekleşmiştir. B2, B3, B4 ve B8 kirişlerinde etriyeler akma sınırına ulaşmış; B6 kirişinde ise yaklaşmış olduğundan daha yüksek yapısal başarımlar elde edilmiştir. Bazı numuneler için kemerin gergi çubuğu görevini üstlenen boyuna donatının uç kısımlarında kenetlenme hasarı da görülmüştür.

Eğilme davranışı söz konusu olmadığından kirişlerin taşıma gücü kapasitesi, sehim ve eğrilik değerleri birbirleriyle uyumlu niteliktedir. Özellikle değinmek gerekir ki deney numunelerinin hiçbirinin göçme anında tamamen kesme kırılmasını işaret edecek şekilde çok ani ve gevrek bir kırılma durumuna şahit olunmamıştır. Mesnet veya yükleme noktalarında bariz bir ezilme durumu da söz konusu olmadığından betonun basınç gerilmeleri altında ezilmesiyle göçme durumuna ulaşılmadığı da belirtilmelidir. Ayrıca hayali kemerin gergi çubuğu görevini yapan boyuna donatıda da akma görülmemiştir. Zira boyuna donatıya gerinim pulu yapıştırılan B1 kirişinde azami birim şekil değiştirme değeri %0,14 olarak ölçülmüştür.

Kiriş eksenine 90° açı yapan etriyeli B2 kirişi ile 45° açı yapan etriyeli (V tipi) B8 kirişinin kırılma yükleri karşılaştırıldığında %8 oranında bir artış ortaya çıkmaktadır. Hâlbuki kafes kiriş modelini temel alan yöntemlerle de ulaşılabilecek sonuçlara göre yaklaşık %40 oranında daha fazla kesme yükü beklenmektedir (90°'lik etriye, asal çekme gerilmeleriyle arasındaki 45° açıdan dolayı kesme dayanımında V tipi etriyelere nazaran $\cos 45^\circ = 0,707$ oranında katkı sağlamaktadır.)

Çizelge 3. Kiriş deneylerinden elde edilen sayısal sonuçlar

	Taşıma Gücü (kN)	Sehim (mm)	Enerji Tük. Kapasitesi (kN·m)	Eğrilik (10 ⁻⁶ rad/mm)	Etriye Birim Şekil Değ. (%)
B1 (0-000)	545	3,47	1,04	4,01	-
B2 (N-135Ü)	762	5,91	2,80	8,39	Akmıştır
B3 (N-135A)	723	5,93	2,41	7,22	Akmıştır
B4 (N-090Ü)	697	5,36	2,18	5,71	Akmıştır
B5 (U-180Ü)	614	4,80	1,58	5,20	0,116
B6 (C2-000)	710	6,23	2,43	6,41	0,162
B7 (U2-000)	734	5,33	2,20	5,38	0,113
B8 (V-135Ü)	823	6,98	3,25	16,63	Akmıştır
B9 (A-135Ü)	489	4,90	1,49	3,59	-0,046

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda bu değerlere ulaşılamaması, kirişteki kemer davranışının hâkim olduğunun bir diğer göstergesi şeklinde değerlendirilebilir. B2 kirişinin eriştiği azami kesme kuvveti değeri üzerinden bir hesaplama yapıldığında, etriyelerin taşıma gücüne katkısının yaklaşık %20 civarında olduğu söylenebilecektir. B2 kirişinde eğik çatlak ile iki adet etriyenin kesiştiği ve etriyelerin akma noktasına ulaşması üzerinden karşılaştırma yapıldığında da bu değere yakın sonuçlar görülmektedir.

B8 kirişinde V şeklinde 45° açıyla yerleştirilen etriyeler, kesme açıklığında ortaya çıkan eğik çatlaklara neredeyse dik olması ve ayrıca çatlakları kesen etriye sayısının daha fazla olması sebebiyle kirişin kesme dayanımına önemli miktarda katkı sağlarken yine hayali kemeri sargılayarak yapısal davranışı iyileştirmektedir. Ancak a/d oranının 1'e yakın olması sebebiyle kesme etkisi hâkimiyetini yitirdiğinden, a/d oranı daha yüksek kirişlere nazaran toplam göçme yükünde sağladığı artış oranı sınırlı kalmıştır.

B9 kirişinde A şeklinde 45° açıyla yerleştirilen etriyelerin ise, gergili kemer davranışı sebebiyle ortaya çıkan düğüm noktası bölgelerinde boyuna yerleştirilmiş olan çekme donatısına baskı yaparak burkulmasını sağladığı ve düğüm bölgesinin dayanımını düşürdüğü, bu sebepten dolayı da etriyesiz kirişe nazaran daha düşük bir kırılma (göçme) yükü elde edildiği düşünülmektedir. Bu etriyeler, mesnet ve yük noktaları arasındaki basınç çubuğuna da herhangi bir sargı etkisi uygulamadığından veya basınç çubuğunun taşıma kapasitesini artırma yönünden değerlendirilirse beton basınç dayanımıyla kıyaslandığında çok düşük kaldığından yapısal davranışa olumlu bir katkı sağlamamış hatta taşıma gücü kapasitesini düşürmüştür.

SONUÇLAR

Geçmiş çalışmalarda da vurgulandığı üzere betonarme kirişlerde kesme açıklığının küçük olması halinde kesme etkisiyle mesnetler yakınında 45° açılı eğik çatlaklar oluştuğundan sonra kemer davranışı ön plâna çıkmaktadır. Bu çalışmada da etriyesiz kirişin göçme yükü, hesaplanan kesme kapasitesini aşmış olup gergili kemer etkisinin varlığı ortaya konmuştur. Etriye bulunan kirişlerde ise eğilme kapasitesine yaklaşılmıştır. Bu kirişlerde hayali basınç çubuklarına uygulanan sargı etkisinin yanı sıra kesmeden kaynaklanan asal çekme gerilmelerini karşılamada da etriyelerin etkili olduğu ve etriyelerin uygulama biçimi açısından beton-donatı kenetlenmesinde farklı davranış sergilediği görülmüştür. Etriyeler ayrıca kemer davranışına bağlı olarak kiriş içerisinde iç içe geçmiş olan ara kemerlerin birbirine yük aktarmasını, diğer bir ifadeyle tutunmasını sağlamak üzere askı donatısı görevini de üstlenmektedir. Bu sebepten ötürü yine çekme gerilmesine maruz kalacaklarından etriyelerin kenetlenme hususuna yeterince dikkat edilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Etriyelerden alınan birim şekil değiştirme değerlerinin kesme kuvveti ile ilişkileri incelendiğinde 135° ve 90° kancalı etriye bulunan kirişler taşıma gücüne eriştiklerinde etriyelerin akma noktasını aştıkları, diğer bir ifadeyle yeterli kenetlenme göstererek tam kapasite çalıştıkları görülmüştür. Ancak 135° kancalı kirişlerin taşıma gücü ve ayrıca eğrilik üzerinden bakıldığında sünekliklerinin daha yüksek olması kanca biçiminin kenetlenme üzerindeki katkısını gözler önüne sermektedir. C2 ve U2 tipi düz bindirmeli etriye bulunan kirişlerde de kenetlenme yetersizliğinden dolayı yapısal başarımlar düşerken 180° kancalı U tipi etriye bulunan kirişte daha da düşük değerler elde edilmiştir. Bu kirişteki düşük başarımları, kancalarda ortaya çıkan gerilme yığılmalarına bağlamak mümkün olacaktır.

Genel yaklaşıma uygun olarak kiriş eksenine 90° dik açıyla yerleştirilen etriyeler, asal çekme gerilmelerine karşı kesme dayanımını artırmanın yanı sıra basınç etkisi altındaki beton kemeri sargılayarak yapısal davranışa kararlılık kazandırmış, bu sayede basınç çubuğunun ezilmesini önleme adına da katkı sağlamıştır. Literatürde, beton dökümünde üst yüze yakın olan donatıların aderansında genel olarak zayıflamadan bahsedilmektedir. Ancak etriye kancaları 135° açı ile bükülmek suretiyle çekirdek beton içerisine gömüldüğünden ve ayrıca yüklemeye gereği betonarme kirişin üst bölgesinde asal basınç gerilmeleri hâkim olduğundan; kancaları

üst kısımda teşkil edilen etriyelerin kenetlenmede gösterdiği başarı, göçme yükünün de artmasını beraberinde getirmiştir. 135° kancaların çekme kuşağında yani kiriş altında bulunması halinde ise taşıma gücünde %5 civarında bir düşüş mevcuttur. Bu çalışmada kirişlerin eğilme kapasitesini artırmak için gereken çekme donatısının iki kattan daha fazla miktarda yerleştirilmesi de taşıma gücünü artırmıştır. Zira eğik çatlakların ortaya çıkması ardından boyuna donatının sergilediği kaldırma etkisinin davranışa katkısı daha yüksek seviyede olmuştur.

Bütün sonuçlar değerlendirildiğinde, genel kabullere uygun olarak, betonarme kirişlerdeki etriyelerin asal çekme gerilmeleri doğrultusunda yerleştirilmeleri taşıma gücü ve süneklik açısından yapısal başarıyı artıran en önemli etken olup ardından ise kenetlenme etkisi gelmektedir. Zira 135° kancalı etriyeler 90° kancalı etriyelere nazaran daha etkili olmuş, düz bindirmeli etriyelerde ise katkı daha düşük seviyelerde kalmıştır. 180° kanca bulunan etriyelerde ise gerek bükme esnasında donatının mekanik yönden zayıflaması ve gerekse kancalar ayrı boyuna donatılar üzerinde bulunduğu tek başlarına çalışmak zorunda kalması ve gerilme yığılmalarının tesirini artırması sebebiyle yapısal davranışta daha da olumsuz sonuçlar görülmesini beraberinde getirmiştir. Zira laboratuvar ortamında da olsa etriye kancaları yapılırken yönetmeliklere tam olarak uyulmadığı ve kancaların bükülme açısı arttıkça kanca çevresinde ortaya çıkan gerilme yığılmalarının kenetlenmeyi daha da düşürdüğü göz ardı edilemeyecektir.

Özet olarak, betonarme kirişlerde kesme açıklığının küçük olması ve dolayısıyla gergili kemer davranışının ortaya çıkması, kesme davranışını tamamen ortadan kaldırmamakta ve enine donatının yapısal davranış üzerindeki önemini azaltmamaktadır. Enine donatının yerleştirilme açısı ve kenetlenme özellikleri, davranışta gözle görülür farklar yaratırken özellikle kesme etkisinin hâkim olduğu betonarme elemanlarda ilave hassasiyet gerektirmektedir. Etriye yerleşiminde ilgili standartlardaki kıstaslardan feragat edilmeyecek şekilde ihtiyaca yönelik olarak farklı yaklaşımlarla yapısal davranışın daha da iyileştirilmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] E. Mörsch, *Concrete-Steel Construction (Der Eisenbetonbau)*, Almanca 3.ncü baskıdan İngilizce çeviri (1909), Ed: Goodrich, E.P. McGraw-Hill Book Company, New York, 1902.
- [2] G.N.J. Kani, The riddle of shear failure and its solution, *ACI Journal Proceedings*. 61(4) (1964) 441-468.
- [3] U. Ersoy, G. Özcebe, *Betonarme*, Evrim Yayınevi, İstanbul, 2001.
- [4] S.-C. Lee, J.-Y. Cho, B.-H. Oh, Shear behavior of large-scale post-tensioned girders with small shear span-depth ratio, *ACI Structural Journal*. 107(2) (2010) 137-145.
- [5] M.D. Kotsovos, Behavior of reinforced concrete beams with a shear span to depth ratio between 1.0 and 2.5, *ACI Structural Journal*. 81(3) (1984) 279-286.
- [6] N.S. Anderson, J.A. Ramirez, Detailing of stirrup reinforcement, *ACI Structural Journal*. 86(5) (1989) 507-515.
- [7] TS 500, *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (ICS 91.080.40)*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.